

IN THE U.S. PATENT AND TRADEMARK OFFICE

Applicant(s): MIYORI, Akio  
Application No.:  
Filed: January 25, 2002  
For: GAS FLOW SIMULATION METHOD

Group:  
Examiner:



L E T T E R

Assistant Commissioner for Patents  
Box Patent Application  
Washington, D.C. 20231

January 25, 2002  
2927-0126P

Sir:

Under the provisions of 35 USC 119 and 37 CFR 1.55(a), the applicant hereby claims the right of priority based on the following application(s):

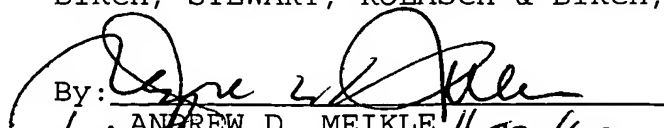
<u>Country</u>	<u>Application No.</u>	<u>Filed</u>
JAPAN	2001-050071	02/26/01

A certified copy of the above-noted application(s) is(are) attached hereto.

If necessary, the Commissioner is hereby authorized in this, concurrent, and future replies, to charge payment or credit any overpayment to deposit Account No. 02-2448 for any additional fees required under 37 C.F.R. 1.16 or under 37 C.F.R. 1.17; particularly, extension of time fees.

Respectfully submitted,

BIRCH, STEWART, KOLASCH & BIRCH, LLP

By:   
ANDREW D. MEIKLE  
Reg. No. 32,868 #22463  
P. O. Box 747

Attachment  
(703) 205-8000  
/ka

Falls Church, Virginia 22040-0747

Jan. 25, 2002  
BSKB, LLP  
(703) 205-8000  
2927-0126P  
1 of 1

日 本 国 特 許 庁  
JAPAN PATENT OFFICE

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されて  
いる事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as  
with this Office

出 願 年 月 日

Date of Application:

2001年 2月26日

出 願 番 号

Application Number:

特願2001-050071

出 願 人

applicant(s):

住友ゴム工業株式会社

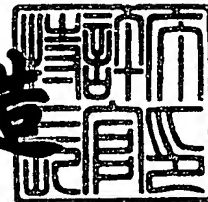
10/054786  
01/25/02

CERTIFIED COPY OF  
PRIORITY DOCUMENT

2001年10月26日

特 許 庁 長 官  
Commissioner,  
Japan Patent Office

及 川 耕 造



出証番号 出証特2001-3094814

【書類名】 特許願

【整理番号】 12428

【提出日】 平成13年 2月26日

【あて先】 特許庁長官殿

【国際特許分類】 A63B 43/00  
G01B 13/00

【発明の名称】 気体流シミュレーション方法

【請求項の数】 10

【発明者】

    【住所又は居所】 兵庫県神戸市中央区脇浜町3丁目6番9号 住友ゴム工業株式会社内

    【氏名】 見寄 明男

【特許出願人】

    【識別番号】 000183233

    【氏名又は名称】 住友ゴム工業株式会社

【代理人】

    【識別番号】 100072660

    【弁理士】

    【氏名又は名称】 大和田 和美

【手数料の表示】

    【予納台帳番号】 045034

    【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

    【物件名】 明細書 1

    【物件名】 図面 1

    【物件名】 要約書 1

    【包括委任状番号】 9814053

【プルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 気体流シミュレーション方法

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 コンピュータにより少なくとも一つの凹部を表面に有する物体を形成すると共に、上記凹部を含む物体の一部表面を抽出し、

上記物体周囲の空間から上記抽出された物体表面と接する部分をブロック状に区切って空間部を形成し、

上記空間部を格子状に区画分割して格子区画を多数形成する一方、

上記空間部に気体を上記物体表面に沿って一方向から流入させると共に空間部内を通過して他方向から流出させ、

上記気体の空間部の流れにかかる運動要素を上記格子区画毎に演算し、

上記凹部周囲の気体の流れを解析することを特徴とする気体流シミュレーション方法。

【請求項 2】 上記気体の流れにかかる運動要素は、三次元空間座標系の各軸方向の気体流の速度、気体流の方向、および、上記物体表面に対する気体流の圧力であり、

これら運動要素を気体流の連続の式およびナビエストークスの式で微小時間毎に演算している請求項 1 に記載の気体流シミュレーション方法。

【請求項 3】 上記演算の結果を基に上記凹部周囲の気体の流れにかかる流れ方向と流れ速度を、ベクトル方向およびベクトル長さにより可視化して解析する請求項 1 または請求項 2 に記載の気体流シミュレーション方法。

【請求項 4】 上記演算の結果を基に上記凹部周囲の気体の流れにかかる圧力分布を等圧線または圧力の等値面により可視化して解析する請求項 1 乃至請求項 3 のいずれか 1 項に記載の気体流シミュレーション方法。

【請求項 5】 上記演算の結果を基に上記凹部周囲の気体の流れにかかる渦度分布を、渦度の等値線または等値面により可視化して解析する請求項 1 乃至請求項 4 のいずれか 1 項に記載の気体流シミュレーション方法。

【請求項 6】 上記演算の結果を基に上記凹部周囲の気体の流れにかかる流線、流跡線、または、パーティクルトレースを可視化して解析する請求項 1 乃至

請求項 5 のいずれか 1 項に記載の気体流シミュレーション方法。

【請求項 7】 上記空間部は、上記物体表面からの高さ寸法を上記凹部の深さ寸法の 1 0 倍以上 1 0 0 0 0 倍以下に設定している請求項 1 乃至請求項 6 のいずれか 1 項に記載の気体流シミュレーション方法。

【請求項 8】 上記空間部は、物体表面から上方へ  $1 / Re^{0.5}$  ( $Re$  はレイノルズ数、 $Re = \text{代表速度} \times \text{代表長さ} / \text{気体の動粘度}$ ) 以下の範囲に位置する各格子区画の区画高さを  $1 / (1000 \cdot Re^{0.5})$  以上  $1 / Re^{0.5}$  以下の範囲で設定し、物体表面から  $1 / Re^{0.5}$  より上方に位置する各格子区画の区画高さは  $1 / Re^{0.5}$  より大きく設定している請求項 1 乃至請求項 7 のいずれか 1 項に記載の気体流シミュレーション方法。

【請求項 9】 上記物体表面は曲面であり、流入および流出する気体の流れ方向を該物体表面の曲率に合わせて修正している請求項 1 乃至請求項 8 のいずれか 1 項に記載の気体流シミュレーション方法。

【請求項 10】 上記物体はゴルフボールであると共に上記凹部はディンプルであり、ゴルフボールのディンプル周囲の気体の流れを解析している請求項 1 乃至請求項 9 のいずれか 1 項に記載の気体流シミュレーション方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、気体流シミュレーション方法に関し、詳しくは、空間を飛行する物体の表面に凹部を設けた場合、凹部周囲の気体の流れにどのような影響を及ぼすか、気体流の運動状況を可視化して解析するものである。

【0002】

【従来の技術】

ゴルフボール、野球ボール等の各種球体の空力特性を解析するため、従来より種々の装置や方法等が提案されている。特に、ゴルフボールの場合、ボール表面に多数設けられるディンプル（凹部）がボールの空力特性に大きく影響を及ぼすことから、ディンプルの大きさ、配置、組合せ等とボールの空力特性との因果関係を認識することが重要である。

## 【 0 0 0 3 】

ゴルフボールに設けたディンプルの相違により飛行特性がどのように変化するかを評価する場合、様々なディンプル仕様のゴルフボールを多種類試作すると共に各試作ゴルフボールの打撃実験を行い、飛距離等を実際に測定してボールの空力特性を判断することがある。また、近年では打撃実験の代わりに試作ゴルフボールを風洞内に配置して揚力係数、効力係数等を測定してゴルフボールの空力特性を分析する方法等も提案されている。

## 【 0 0 0 4 】

図 1 4 は、特開平 6 - 1 9 4 2 4 2 号で開示されている風洞を利用してボールの空力特性を分析する場合であり、風洞内にゴルフボールと共に配置される測定装置 1 は、ゴルフボール等の測定対象物 T を上端に取り付けるアルミシャフト 2 をモータ 3 で回転させると共に、アルミシャフト 2 の周囲に配置された歪型中軸三分力検出器 4 でアルミシャフト 2 の歪みを検出している。風洞で発生させた気流中で測定対象物 T を回転させると、実際の飛行状態と疑似状態になり、測定対象物 T にかかる抗力や揚力をアルミシャフト 2 の歪み量の測定値から導き出し、測定対象物 T の飛行特性を分析している。この測定では、風洞で様々な条件の気流を作り出し種々の条件下での空力特性の測定を可能にしている。

## 【 0 0 0 5 】

## 【発明が解決しようとする課題】

上記のような試作ボールの打撃実験や風洞を利用した測定装置 1 による測定結果は、ゴルフボール全体の空力特性にかかるものであり、ゴルフボールの表面に設けた個々のディンプルの形状、大きさ、配列等が、どのように気体の流れに影響を及ぼすかまで詳細に解析できない問題がある。即ち、ゴルフボールの設計では、新たに設けたディンプルがそれら単独あるいは数個単位からなる特有の配列で、周囲の気体の流れをどのように変化させるかを知ることが最も重要であり、各ディンプルによる気体流の影響を容易に素早く知ることができれば、その内容を設計に反映して狙い通りのゴルフボールを作ることが可能となる。

## 【 0 0 0 6 】

しかし、従来の測定では、個々のディンプル形状等が周囲の気体の流れをどの

ように変化させるかが不明で、変化した気流の結果的な特性しか判断できず、新たに設計したディンプルと空力特性の因果関係を明確に関連づけることもできない。よって、ゴルフボールの開発では、個々のディンプル形状が相違したり、ディンプル配列が相違するゴルフボールを何パターンも多数試作し、上記のような測定を経て、ゴルフボール全体の空力特性から個々のディンプル等の影響を推測するしかなく、効率的な設計ができない問題がある。

## 【 0 0 0 7 】

また、ディンプルの評価も、上記のような測定結果からの推測や過去に蓄積された経験値に基づいて判断するため、どうしても客観的な正確性が欠けてしまう問題もある。よって、新たに設計したゴルフボールが必ずしも狙い通りのものに仕上がらないことも多々あり、その度に設計をやり直すと共に試作ゴルフボールを作り直して空力特性を確かめる必要があるので、新たなゴルフボールの開発にはトータルで時間も費用も大きく費やしてしまう問題がある。

## 【 0 0 0 8 】

本発明は、上記した問題に鑑みてなされたものであり、ゴルフボールのような気体中を移動する物体の開発を効率的に進めるために、特定範囲の物体表面の形状が周囲の気体の流れにどのような影響を及ぼすかを解析して、影響を受けた気体流を視覚的に評価できるようにすることを課題としている。

## 【 0 0 0 9 】

## 【課題を解決するための手段】

上記課題を解決するために、本発明は、コンピュータにより少なくとも一つの凹部を表面に有する物体を形成すると共に、上記凹部を含む物体の一部表面を抽出し、

上記物体周囲の空間から上記抽出された物体表面と接する部分をブロック状に区切って空間部を形成し、

上記空間部を格子状に区画分割して格子区画を多数形成する一方、

上記空間部に気体を上記物体表面に沿って一方向から流入させると共に空間部内を通過して他方向から流出させ、

上記気体の空間部の流れにかかる運動要素を上記格子区画毎に演算し、

上記凹部周囲の気体の流れを解析することを特徴とする気体流シミュレーション方法を提供している。

#### 【0010】

このように、コンピュータ上の仮想空間内にゴルフボールのディンプル等に相当する凹部を有する物体を形成し、この凹部を含むように空間部を形成すれば、この空間部へ連続して流入および流出させる気体流のシミュレーションをコンピュータで行うことにより、物体全体ではなく、個々の凹部が周囲の気体の流れに及ぼす影響を解析できる。即ち、本発明では、物体表面の個々の凹部による気体流の変化を見るために、物体表面の一部とその一部と接する空間部のみをシミュレーション対象にすることで、演算要素を削減して効率的なシミュレーションを達成できる。なお、シミュレーションを行う範囲は適宜増減してより局所的に、あるいは、物体全体に対して気流の変化を解析することも可能である。

#### 【0011】

上記気体の流れにかかる運動要素は、三次元空間座標系の各軸方向の気体流の速度、気体流の方向、および、上記物体表面に対する気体流の圧力であり、

これら運動要素を気体流の連続の式およびナビエストークスの式で微小時間毎に演算している。

#### 【0012】

具体的なシミュレーション方法としては、空間部を分割した格子区画毎に離散化した連続の式および離散化したナビエストークスの式を用いて微小時間毎に演算して運動要素の数値を算出し、これら各格子区画毎の演算結果を組み合わせることで空間部全体にかかる気体流をシミュレーションすることで気体流の変化を解析できる。また、時間の経過に伴う気流の変化や異なる時間帯における気流状況を解析する場合は、微小時間毎に時間を進行させて上記式を演算することで所要時間帯の気体流の変化も解析できる。

#### 【0013】

上記演算の結果を基に上記凹部周囲の気体の流れにかかる流れ方向と流れ速度を、ベクトル方向およびベクトル長さにより可視化して解析している。また、上記演算結果から同様に、凹部周囲の気体の流れにかかる圧力分布を等圧線または



圧力の等値面により可視化し、渦度分布も渦度の等値線または等値面により可視化してそれぞれ解析している。このように得られる演算結果の数値を、ベクトルや等圧線等で置き換えることにより、気体流にかかる各種運動を可視化できる。このような可視化を通じて、凹部による気体流の変化を明確に把握することができ、凹部と空力特性との因果関係も判断できる。なお、凹部周囲の気体流の可視化は、上記以外にも演算結果を基に流線、流跡線、パーティクルトレース等にも対応することが可能であり、気体流の演算結果の数値を専用の可視化プログラムあるいは市販の汎用可視化ソフト等に投入することで数値に対応する各種状況を目的に応じて可視化できる。

## 【0014】

また、空間部に流入する気体は、流出した気体がそのままの状態再度流入すると考えてもよいが、物体自体が回転している場合や物体自体の表面が曲面となっている場合等は、これらの条件を考慮して流出気体の式を条件に合うように適宜変形し、その変形後の気体の式を流入する気体の式として用いて、これを順次繰り返して気体のシミュレーションを行うようにしてもよい。

## 【0015】

さらに、上記のように空間部を分割した各格子区画の形状は六面体に限定されるものではなく、五面体、四面体といった種々の多面体形状で形成してもよく、これらの各形状の多面体を適宜組み合わせて空間部を格子状に区画してもよい。また、このように区画した格子区画毎に滑らかに連続する方程式を切り分けて離散化する方法としては、有限差分法、有限体積法、境界要素法、有限要素法等のいずれかの方法を用いて、格子の交点毎、格子中心毎、各区画内毎等に上記演算を行うようにしてもよい。

## 【0016】

凹部周囲の気体流れのような比較的速度が小さい演算においては、気体を非圧縮性として扱うことが可能なので気体密度を一定にして演算してもよい。演算に関しては、上述した連続の式およびナビエストークスの方程式に数値を代入して直接計算してもよく、気体流を乱流モデルとして乱流速度を加味した速度値を代入して計算してもよい。また、このような演算においては、物体表面を滑りなし

の条件として物体表面と接して流れる気体速度をゼロにしてもよいが、物体が回転する場合は、物体表面と接する気体速度を物体の回転速度成分と同等の値に設定してもよい。

## 【0017】

上記空間部は、上記物体表面からの高さ寸法を上記凹部の深さ寸法の10倍以上10000倍以下に設定している。空間部の物体表面より上方へ離反する方向の高さは、凹部周囲の気体の影響を解析するために少なくとも凹部の深さの10倍は必要であり、高さの上限としては凹部の影響が及ばないで気体の流れが一樣となる範囲で演算に要する時間等がかからないようにするためには、凹部の深さの10000倍を上限とするのが最適である。よって、空間部の高さ寸法をこのような範囲に設定することで正確度が高く演算効率も優れたシミュレーションを実現できる。なお、物体が球体の場合は、空間部の高さ寸法は球体直径の100倍以下に設定することが好ましい。

## 【0018】

上記空間部は、物体表面から上方へ $1/Re^{0.5}$  ( $Re$ はレイノルズ数、 $Re = \text{代表速度} \times \text{代表長さ} / \text{気体の動粘度}$ ) 以下の範囲に位置する各格子区画の区画高さを $1/(1000 \cdot Re^{0.5})$ 以上 $1/Re^{0.5}$ 以下の範囲で設定し、物体表面から $1/Re^{0.5}$ より上方に位置する各格子区画の区画高さは $1/Re^{0.5}$ より大きく設定している

## 【0019】

物体の表面付近は、境界層となり気体の流れ速度が大きく変化するため、上記のように物体の表面から $1/Re^{0.5}$ 以内の格子区画は、細かく区分することで詳細に気体の流れをシミュレーションし、凹部と気体流れの変化に対する関連を詳しく解析することができる。また、物体の表面付近を離れると、流れ速度の変化は緩やかになるため、格子区画を上記のように大きく分割して演算回数を減らして演算効率を高めて、シミュレーションに要する時間を削減できる。また、各格子区画の幅は、凹部の影響を確実に確認できるようにするために、凹部の幅(凹部が丸の場合は直径)の4分の1以下程度の寸法にするのが好ましい。なお、上述の空間部や格子区画等は無次元空間における設定なので、数値は無次元数

となり単位は付加されないが、実際のゴルフボール等に基づいて気体流シミュレーションを行う場合は、有次元空間に戻す必要があり、無次元空間の数値に相当する単位を付加して評価を行う。

#### 【0020】

上記物体表面は曲面であり、流入および流出する気体の流れ方向を該物体表面の曲率に合わせて修正している。上記シミュレーション方法を球体等の形状の物体に適用する場合、物体表面は曲面となり気体の流れも曲面に沿ったものとなるため、気体の流れに対して曲面の接線方向や法線方向の成分を算出して上記空間部に流入および流出させることが好ましい。

#### 【0021】

さらに、より詳細なシミュレーションを行う場合は、流入条件として速度分布や気流の乱れ条件を気体の流れに付加してもよく、空間部を通過した物体表面が十分に広い場合等は、流入速度を一様の流速にすると共に流出する速度も前回の時間帯における流出速度と一様にするなどの条件を設定してもよい。なお、物体表面より離れた空間部の上方では凹部による影響が弱まるため物体表面に対する圧力はゼロ、流入出速度は一様の流速でシミュレーションを行うことで、一段と現実的なシミュレーションを行える。

#### 【0022】

上記物体はゴルフボールであると共に上記凹部はディンプルであり、ゴルフボールのディンプル周囲の気体の流れを解析している。このように、本発明のシミュレーション方法をゴルフボールに設けたディンプル周囲の気体流に適用することで、シミュレーション結果をゴルフボールのディンプル設計に役立てることができる。

#### 【0023】

即ち、ゴルフボールのディンプル効果は、ボール表面での気体の流れである境界層を積極的に乱流化し、ボール表面から流れの剥離点を後方へ移動させることで、気体抵抗を削減することである。よって、上記のようにコンピュータでディンプル周囲の気体流をシミュレーションして可視化すると、ディンプル内外の流れの状況および気体の流れが乱入に遷移してディンプル効果が生じているかを一

目で判断することができ、新たに設計したディンプルの大きさ、配置、配列等が最適か否かを容易に評価できる。その結果、ゴルフボールの試作および実験を行わずにゴルフボールの評価が可能となり、設計に係る無駄も解消されゴルフボール開発のスピードアップに貢献できると共に開発費用も大幅に削減できる。

#### 【0024】

なお、上記した気体流のシミュレーション方法は、プログラムの形態でCD、DVD等の記憶媒体に記録し、これら記録したCD、DVD等から汎用コンピュータでプログラムを読み出すことにより、当該コンピュータを気体流シミュレーション装置として機能させることができる。

#### 【0025】

##### 【発明の実施の形態】

以下、本発明の実施形態を図面を参照して説明する。

図1は、本発明の気体流シミュレーション方法にかかるシミュレーション装置10であり、CPUや記憶装置等を備えた本体部10aとディスプレイ10b等からなるコンピュータをハード的に利用している。ソフト的には本体部10aの記憶装置に本発明のシミュレーション方法にかかるプログラムが保存されており、上記シミュレーション用プログラムの実行で種々の気体流シミュレーションを可能にしている。

#### 【0026】

図2は、シミュレーション装置10に内蔵されたプログラムのシミュレーション方法の流れを示しており、まず、シミュレーション装置10は、シミュレーションの準備段階として、図3にも示すように、プログラムに含まれる作図ソフトでシミュレーションにかかる対象の物体として、球体20をコンピュータの仮想空間上で三次元的に作成している。上記作図ソフトでは、球体以外にも、三角錐、四角柱、立方体等の各種形状の物体を作成することが可能であり、また、作成した物体の表面に凹凸を設ける等、表面の形状も様々に作成可能にしている。

#### 【0027】

本発明では、球体20の表面の凹部の影響をシミュレーションするため、表面に少なくとも一つの凹部21を有する球体20を作成し、これら凹部21を含む

ように球体 20 の表面から一定の範囲を抽出して、シミュレーションの対象となる球体表面 22 を形成している。

#### 【0028】

次に、気体流のシミュレーション対象となる空間をモデル化するために、球体 20 の周囲の空間 25 において、抽出した球体表面 22 と接する一部をブロック状に区切って空間部 26 を形成している。この際、演算効率を考慮した上で物体表面の凹部 21 による気流の変化の状態を十分に評価できるように、空間部 26 の高さ  $H$  を凹部 21 の深さ寸法の 10 倍以上で 10000 倍以下あるいは球体 20 の直径の 100 倍以下に設定している。

#### 【0029】

このように形成した空間部 26 を、図 4 に示すように、球体表面 22 も含むようにして格子状に分割し、多数の格子区画 26a を形成している。分割する格子区画 26a の大きさは種々設定可能であり、部分的に各区画寸法等を相違させることも可能にしている。図 4 では、物体表面 22 の近傍は境界層となり気体流の変化が大きく、上方は気体流の変化も小さいことを考慮して、球体表面 22 は格子区画 26a の高さ寸法を小さく分割し、上方へ行くに従い徐々に高さを大きくしている。具体的には、物体表面 22 から上方へ  $1/Re^{0.5}$  ( $Re$  はレイノルズ数、 $Re = \text{代表速度} \times \text{代表長さ} / \text{気体の動粘度}$ ) 以下の範囲に位置する各格子区画 26a の区画高さ  $dh$  は、レイノルズ数と関連づけて  $1/(1000 \cdot Re^{0.5})$  以上で最大でも  $1/Re^{0.5}$  以下になるように設定している。また、物体表面 22 から  $1/Re^{0.5}$  より上方に位置する各格子区画 26a の高さ  $h$  は  $1/Re^{0.5}$  より大きく設定している。

#### 【0030】

また、各格子区画 26a の形状は、図 5 にも示すように、六面体である立方体に形成し、これら格子区画 26a における位置を規定するため、空間部 26 において球体表面 22 と平行面上（接線方向）で後述する流体を流す方向と一致する方向を  $x_1$  方向、 $x_1$  方向と同一面上で直交する方向を  $x_2$  方向、 $x_1$  方向と  $x_2$  方向で形成される面の垂直方向を  $x_3$  方向に設定している。

#### 【0031】

なお、格子区画 26a の形状は、六面体以外にも、図 6 (A) (B) (C) に示す格子区画 26a'、26a''、26a''' のように、三角錐、四角錐、三角柱等の形状に形成することが可能であり、さらに、図 6 (D) に示すように、これら種々の形状を組み合わせて空間部 26' を区画分割することもできる。このような多種類におよぶ空間部の格子状の区画はシミュレーションにかかる物体の形状や条件等を考慮して適宜決定している。

## 【0032】

上記のように空間部 26 および格子区画 26a をモデル化した後、シミュレーション用プログラムは、図 7 に示すように、気体（空気）T を球体表面 22 に沿って空間部 26 の一面 26b 側から流入させ、空間部 26 の内部を通過させて他面 26c 側より流出させている。このような気体 T の流れに関する運動は、下記に示す一般的な物体の運動における質量保存則に相当する連続の式 (1) および一般的な物体の運動量保存則に相当するナビエーストークスの式 (2) を用いて表すようにしている。

## 【0033】

## 【数 1】

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i) = 0 \quad \dots (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho v_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho v_i v_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} P_{ij} + \rho K_i \quad \dots (2)$$

## 【0034】

上記式 (1) (2) は、テンソル形式で表記されており、 $\rho$  は気体の密度、 $v$  は速度、 $K$  は気体の単位質量あたりに働く外力、 $P$  は気体に働く応力テンソル、 $t$  は時間を示している。なお、外力  $K$  には重力や浮力等が該当し、応力テンソル  $P$  には物体表面への圧力や剪断成分が該当する。また、 $P_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ) は、上述した  $x_1 \times x_2 \times x_3$  による三次元空間座標系における 9 個の数によ

り下記の 3 行 3 列の行列である数式 (3) で表記できる。

$$\begin{matrix} P_{11} & P_{11} & P_{13} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} \end{matrix} \quad \dots (3)$$

【0035】

上記のような物体周囲に連続して気体 T を流すシミュレーションでは、空間部 26 の各格子区画 26a 毎に空気の流れを演算により解析している。この演算に上記二式 (1) (2) を用いており、空間部 26 を格子区画 26a で区切ったことに対応して上記二式を離散化して演算を行っている。なお、シミュレーションの方法はシミュレーションの条件等を考慮して有限差分法、有限体積法、境界要素法、有限要素法等を適宜選択して行っている。

【0036】

上記離散化された二式による演算は、有限差分法を用いる場合であれば、例えば、各格子区画 26a の各交点で微小時間  $dt$  毎に逐次演算を行い、特定時間における気体の流れに関する運動要素である気体速度、流れ方向、物体表面への気体圧力をそれぞれ求め、これら各交点の演算結果を組み合わせることで空間部 26 全体の気体の流れにかかる運動を数値化できる。以降、微小時間  $dt$  経過毎に上記と同様の演算を行い、各時間帯における気体流の運動を数値化している。また、上記演算は各格子区画 26a の交点で行う以外には、各格子区画 26a の中心や格子面上で行ってもよい。

【0037】

上記のようにして求められた気体流の運動に関する各数値は専用あるいは汎用の可視化ソフトを用いて視覚的に表示しシミュレーションの結果を判断している。可視化する場合、例えば、速度の方向と大きさのみをベクトルで表示して物体表面や周囲の速度がどのようなになっているかを表示したり、物体表面への同じ圧力値を結んだ等圧線や等圧面で圧力分布を表示するなどして、気体の流れに関する種々の要素を視覚的に示している。このようにして物体表面の形状等が如何に周囲の気体の流れに影響を及ぼすか可視化して、物体表面形状の設計等に役立っている。

## 【0038】

なお、上記に説明した気体流シミュレーション方法は、シミュレーションの条件等に合わせて種々の変形が可能であり、例えば、気体の流れを表示する式(1)(2)を下記に示すように、積分式(4)(5)の形で適用してもよい。また、気体流として乱流モデルを用いる場合は、これら各式(1)(2)(4)(5)において気体速度 $v$ に対して乱流成分の乱流速度 $v'$ を加えて値の $v+v'$ を速度成分として演算してもよい。

## 【0039】

## 【数2】

$$\iiint_V \left( \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i) \right) dV = 0 \quad \dots (4)$$

$$\iiint_V \left( \frac{\partial}{\partial t} (\rho v_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho v_i v_j) - \frac{\partial}{\partial x_j} P_{ij} - \frac{\partial}{\partial x_j} \rho K_i \right) dV = 0 \quad \dots (5)$$

## 【0040】

さらに、気体流の境界条件となる球体表面22の気体流の速度は、通常は滑りなしと考えて気体速度 $v=0$ と設定するが、回転する物体周囲の気体流をシミュレーションの条件する場合等は、球体表面22の回転速度成分 $v''$ を考慮して気体速度 $v$ に回転速度成分 $v''$ を加えた値を速度成分として演算してもよい。また、空間部26への気体の流入および流出は上述した繰り返し条件以外にも、球体表面22のように表面が曲面である場合等は曲面の接線方向の速度成分を考慮して気体速度を設定してもよい。

## 【0041】

上記した気体流シミュレーション方法を、ゴルフボールに設けたディンプルによる気流の変化をシミュレーションする場合を実験例として、更に詳細に説明する。

本実験例では、ゴルフボールが30 m/sの速度 $V$ で空気中を飛行する際の気



体流の状況をシミュレーションすることとした。

【0042】

シミュレーション装置10により、まず、図3のようにシミュレーションにかかるゴルフボールに相当する球体20を形成しており、本実験例では直径寸法が42.5mmの球体20を形成した。また、球体20の表面にはディンプルに相当する略半球の窪みである凹部21を多数設けており、これら各凹部21の直径寸法は3.145mm、深さtは0.24225mmとした。なお、本実験例では球体20の1.2875cm×1.2875cmの表面範囲に9個の凹部21が存在するようにした。

【0043】

次に、上記のように形成した球体20の表面を1.2875cm×1.2875cmの範囲に9個の凹部21が存在するように球体表面22を切り出して抽出し、この抽出した球体表面22と接する空間部26を、図4のように球体20の周囲空間25よりブロック状に区切って形成した。空間部26の高さHは、気体の流れが一樣となる箇所を含ませるため、凹部21の深さtの約1754倍で球体20の直径の10倍の長さとなる425mmに設定した。

【0044】

この空間部26を、図7のように、球体表面22も含めて格子状に区画分割して格子区画26aを形成しており、図4に示す球体表面22の直上の格子区画26aの高さdhは、 $1/(10 \cdot Re^{0.5})$ に設定し、以降、球体表面22から上方へ $1/Re^{0.5}$ 離れた範囲まで各格子区画26aの高さを、最大でも $1/Re^{0.5}$ を越えない範囲で徐々に増大させている。

【0045】

なお、各格子区画26aの高さは無次元数であり、この無次元数を有次元空間に置き換えた場合に相当する寸法を、dhを例にして求めると以下ようになる。即ち、レイノルズ数Re ( $Re = V \cdot D / \nu$ ) は空気の動粘度 $\nu$ が $15.01 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ であることと、代表長さDをゴルフボールの直径42.5mmとし、代表速度Vであるボール速度は30m/sと設定すると、 $8.49 \times 10^4$ となり、球体表面22の直上の格子区画26aの高さdhは、 $1/10Re$

$0.5$  に代表長さ  $D$  をかけて  $1.45859 \times 10^{-2}$  mm に相当する寸法に設定されることになる。

## 【0046】

また、物体表面 22 から  $1/10 Re^{0.5}$  を越える範囲では、格子区画 26 a の高さ  $h$  を  $1/(10 \cdot Re^{0.5})$  より大きく設定して、上方へ向かって徐々に高さを増大させており、有次元空間で置き換えた場合、高さ  $h$  の最大値は 100 mm に相当する寸法になっている。なお、物体表面 22 から  $1/(10 \cdot Re^{0.5})$  を越える格子区画 26 a は、徐々に増大する高さが一定寸法を超えれば、それより上方の高さを一定にして演算を容易にするようにしてもよい。また、格子区画 26 a の幅寸法は、縦及び横方向 ( $x_1$  および  $x_2$  方向) とともに凹部 21 の内部の気流の変化を細かく判断できるように、凹部 21 の直径を八分割した寸法に設定した。

## 【0047】

上記のようにシミュレーションの対象をモデル化した状態で、図 7 に示すように、空気 T を空間部 26 の一面 26 b 側より球体表面 22 に沿って流入させ、空間部 26 の内部を通過して他面 26 c 側より流出させた。空気 T の流入速度  $v_1$  は球体 20 の速度  $V$  が 30 m/s の条件でシミュレーションするため、流入速度  $v_1$  も 30 m/s に設定して、球体 20 がこの速度で飛行しているのと同様の状況を作り出した。

## 【0048】

なお、本実験例では、流出速度  $v_2$  を流入速度  $v_1$  と同値にして速度を一様流速にしているが、球体表面 22 は曲面であるため、流入速度  $v_1$  と流出速度  $v_2$  は速度方向を球体表面 22 の接線方向となるようにしている。即ち、図 8 に示すように、流入速度  $v_1$  および流出速度  $v_2$  が水平線 S と交差する角度を  $\theta$  とすると、

$$|v_1| \sin \theta = -|v_2| \sin \theta \quad \dots (6)$$

$$|v_1| \cos \theta = |v_2| \cos \theta \quad \dots (7)$$

の関係が成立するように球体表面 22 の曲率を考慮した。また、空気 T を非圧縮性として扱い密度  $\rho$  も一定とし、空間部 26 の上面部の圧力はゼロ、球体表面 2

2を滑りなしの条件として球体表面22における速度成分もゼロとした。

【0049】

上記空気Tの流れは、空間部26の一面26b側から他面26c側へと連続したものであるが、離散化した状態で上記した式(1)(2)を用いて、空気Tの運動要素である流れ速度および方向、球体表面22に対する圧力を演算している。上記離散化は有限差分法で行い、図9に示すように、各格子区画26aの交点のうちで球体表面22との交点を除いた(図中白丸で示す)交点毎に(図中黒丸で示す)、各交点の $x_1 \times x_2 \times x_3$ 座標値、および、上述した各数値を式(1)(2)に代入して微小時間 $dt$ で演算し、空間部26全体にわたる上記運動要素の値を演算している。以降、微小時間 $dt$ 毎に時間を進行させて随時演算を行い、各時間帯における空気Tの運動要素の値を演算した。

【0050】

次に、本実験例では、空気Tの運動を可視化するため、上記演算値を基に市販の可視化ソフト(FIELD VIEW: 米国Intelligent Light社製)を使用して、空気Tの流れ状況を可視化している。図10は、ある時間における一つの凹部21の周囲の空気Tの流れ速度および方向を視覚的に表示したものであり、ベクトルとして矢印の長さで空気Tの速度を示すと共に矢印の方向で空気Tの流れの方向を示した。よって、凹部21の内部では、速度は遅いが空気Tの流れの方向と逆向きの気流が発生していること、球体表面を離れるにつれ速度が上昇することが判明した。なお、空気Tの流れ方向は、上記演算で各三次元直交座標毎の成分を合成した速度方向と一致させている。

【0051】

図11は、ある時間における一つの凹部21周辺の断面で、渦流の渦度分布状況を渦度の等値線で示しており、球体表面22のランド部22aに沿って細長の渦が発生して境界層は乱流が発生した状況となっており、凹部21の内部では、別パターンの渦流が発生していることが分かる。図12は、ある時間における一つの凹部21の表面に対する空気Tの圧力分布を示しており、等圧箇所を線で結んで視覚的に断面で表示した。図12より部球体表面22のランド部22aと凹部21の後半部分を中心に圧力が変化していると共に、これらの箇所で等圧線の

間隔が狭いので圧力変化も大きいことが分かる。なお、渦度分布や圧力分布は圧力の等値面により可視化するようにしてもよい。また、上記以外にも演算値を基に、流線、流跡線、パーティクルトレース等も線分や色分け等で可視化可能である。

## 【0052】

このように、本発明のシミュレーション方法を用いれば、ゴルフボールを試作しなくても、ディンプルによる空気の流れの様子を評価することができ、ディンプル単位で、または、複数のディンプルの配列で、空気の流れの状況にどのように影響を及ぼすかを判断可能にしている。この判断をゴルフボールの設計に反映させることで設計効率を向上させることを可能にしている。

## 【0053】

なお、本発明は、上記実施形態および実験例に限定されるものではなく、演算対象の範囲を凹部一個のみから物体全体まで適宜増減することが可能であり、演算の効率化を図るため、球体より抽出した表面を平面に近似して演算を行うようにしてもよい。一方、回転時の球体をシミュレーション対象にする場合は、球体表面の速度をゼロにするのではなく、球体の回転速度で球体表面の接線方向の成分を球体表面に速度として演算するようにしてもよい。

## 【0054】

また、空間部への気体の流入および流出条件は一様流速とする以外に、シミュレーションの条件に応じて、速度分布や気流の乱れ条件を流入速度に成分として付加してもよい。さらに、抽出した球体表面の面積が充分広い場合には、最初の流入速度  $v_1$  は一様流速とすると共に空間部を通過する際の影響を考慮して流出速度を次の演算時の流入速度にする場合は、流出速度  $v_n$  が  $v_n = v_{n-1}$  ( $n$  は演算回数) の関係を成立させるようにしてもよい。その上、演算効率を高めるため、図13に示すように、曲面の球体表面22を平面表面22'にして式(6)(7)のような換算を省略して演算するようにしてもよい。

## 【0055】

## 【発明の効果】

上記した説明より明らかなように、本発明の気体流シミュレーション方法を用

いると、球体の表面に設けた凹部自体による気体流の変化を、視覚的に凹部単位であるいは一定の配列単位で評価することができる。即ち、本シミュレーション方法にかかるプログラムでは、凹部の大きさや、形状、配列等に関して様々な種類をコンピュータ上で容易に作り出すことができ、これら新たに作り出した凹部が周囲の気体流にどのような影響を与えるを客観的に判断できる。よって、凹部自体と気流との因果関係を明確に認識でき、従来のような実験値や経験値に頼ることなく凹部の設計を行うことができる。これにより、本発明をゴルフボールのディンプル設計時に適用すれば、ディンプルの効果を正確かつ客観的に評価して、これらの結果を設計に反映することで効率的なゴルフボールの開発を進めることができる。

#### 【 0 0 5 6 】

また、気体の流れの条件も種々設定可能なため、あらゆる条件でのシミュレーションを行うことができ、従来の風洞を用いて風を発生させて実験を行う場合に比べ、はるかに多くの条件に対する評価を短時間で行うことができる。さらに、評価する上記凹部による気流への影響はコンピュータ上のシミュレーションのみで行うため、従来のようにディンプルの仕様が異なるゴルフボールを実際に多種類試作して実験を行う必要もなくなり、ゴルフボール開発にかかる時間や費用を大幅に低減することができる。

#### 【図面の簡単な説明】

【図 1】 本発明の気体流シミュレーション方法にかかるコンピュータの概略図である。

【図 2】 本発明の気体流シミュレーション方法のフローチャート図である。

【図 3】 シミュレーションの対象となる球体および空間部の概略図である。

【図 4】 空間部の格子区画の概略図である。

【図 5】 空間部の格子区画の要部詳細図である。

【図 6】 (A) (B) (C) は、変形例の格子区画の形状を示す概略図、(D) は空間部における変形例の区画分割の概略図である。

【図 7】 空間部における気体の流れの状況を示す概略図である。

【図 8】 各方向の気流の速度成分を示す概略図である。

【図 9】 有限差分法による演算対象となる格子区画の各交点を示す概略図である。

【図 1 0】 気体の速度および方向の可視図である。

【図 1 1】 気体の渦流の可視図である。

【図 1 2】 気体の等圧分布の可視図である。

【図 1 3】 球体表面の簡略化を示す概略図である。

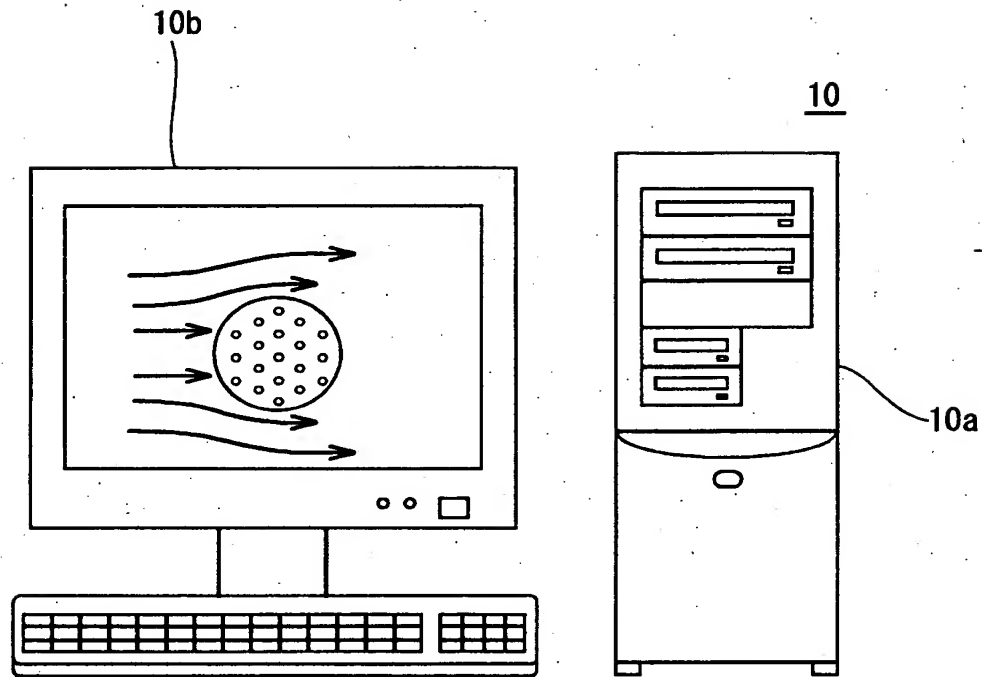
【図 1 4】 従来の計測装置の概略図である。

【符号の説明】

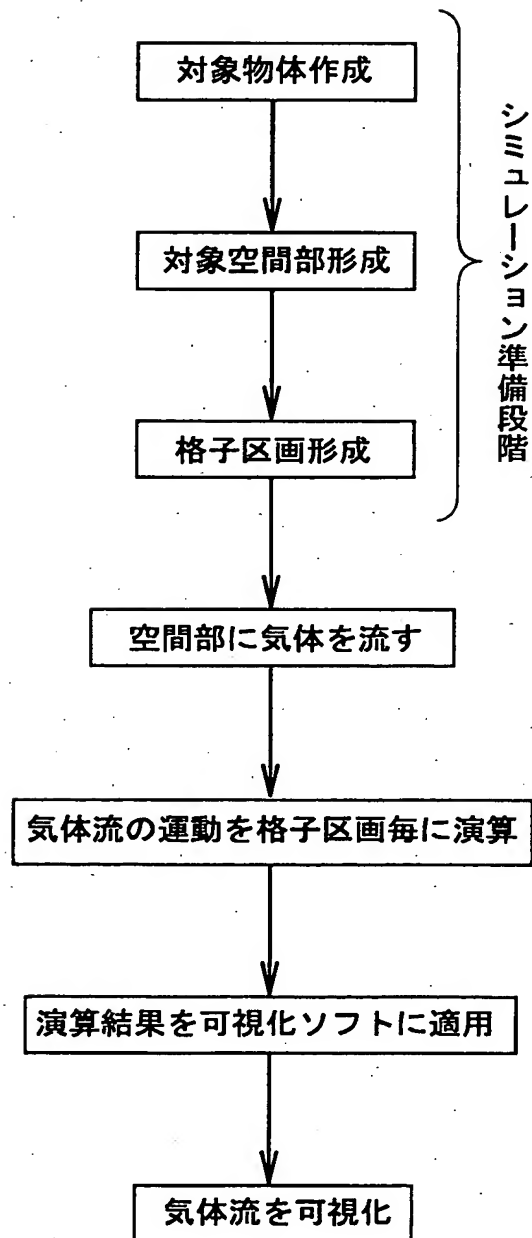
1 0	コンピュータ
2 0	球体
2 1	凹部
2 2	球体表面
2 5	空間
2 6	空間部
2 6 a	格子区画
T	空気

【書類名】 図面

【図 1】

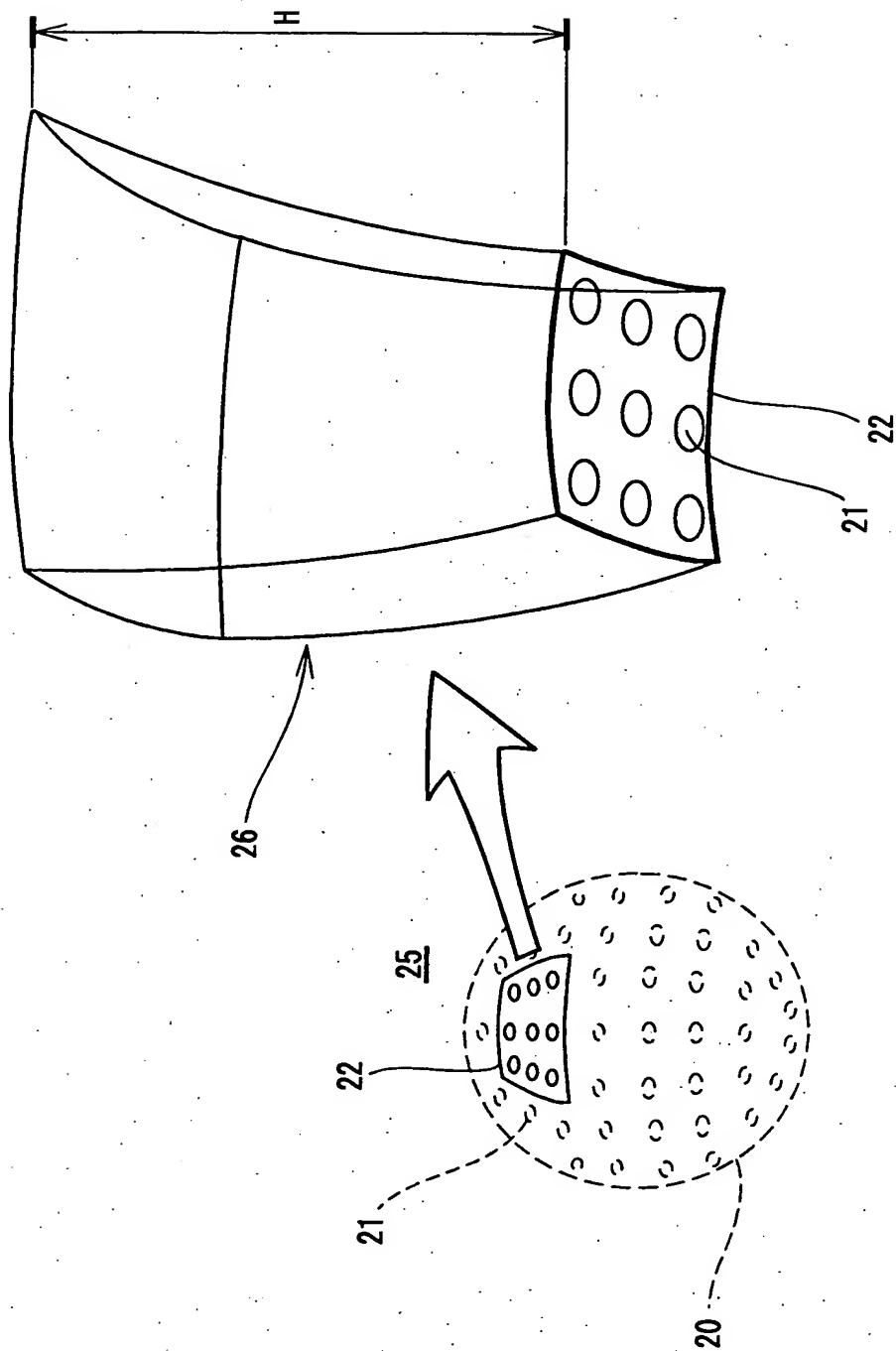


【図 2】

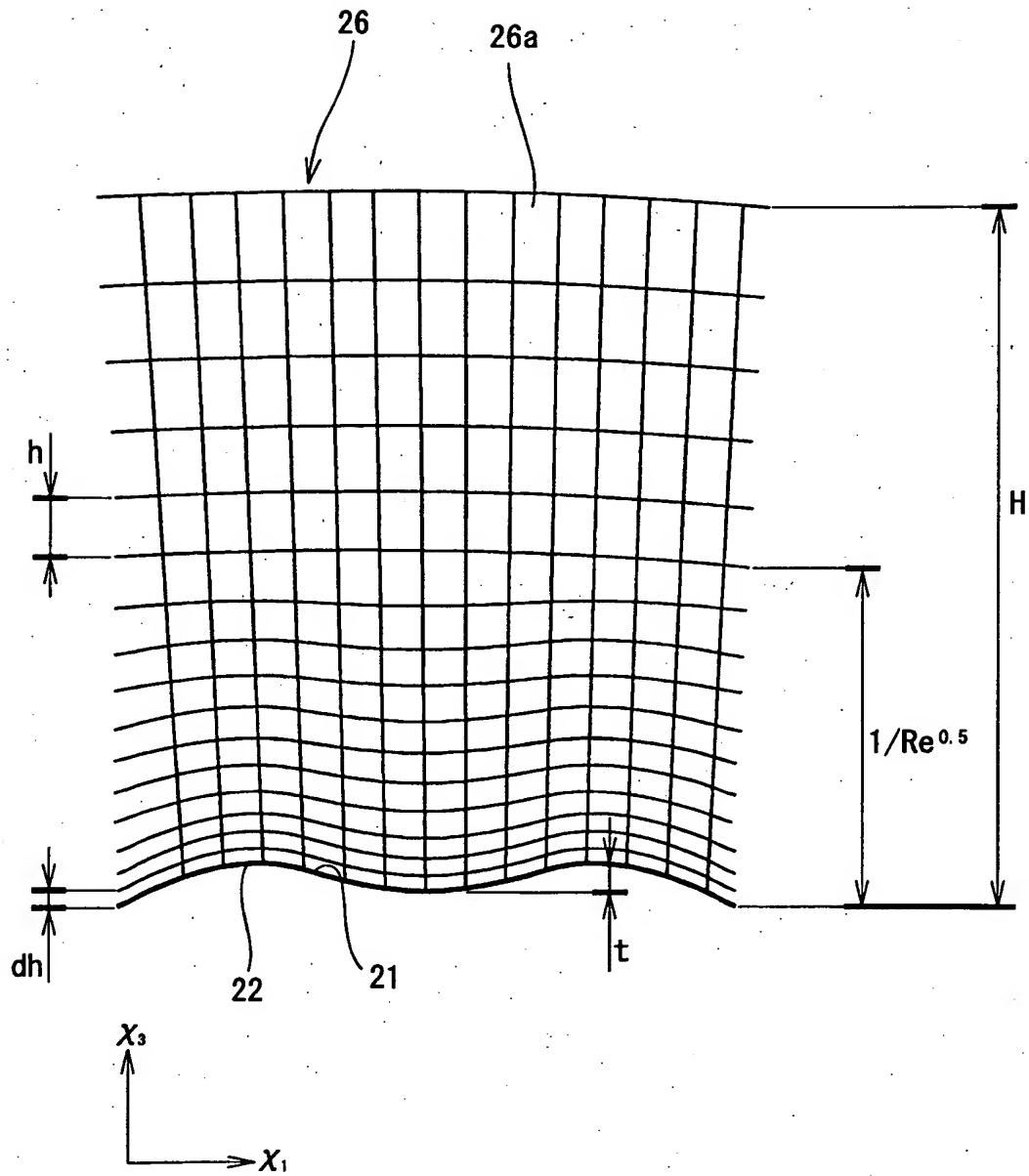




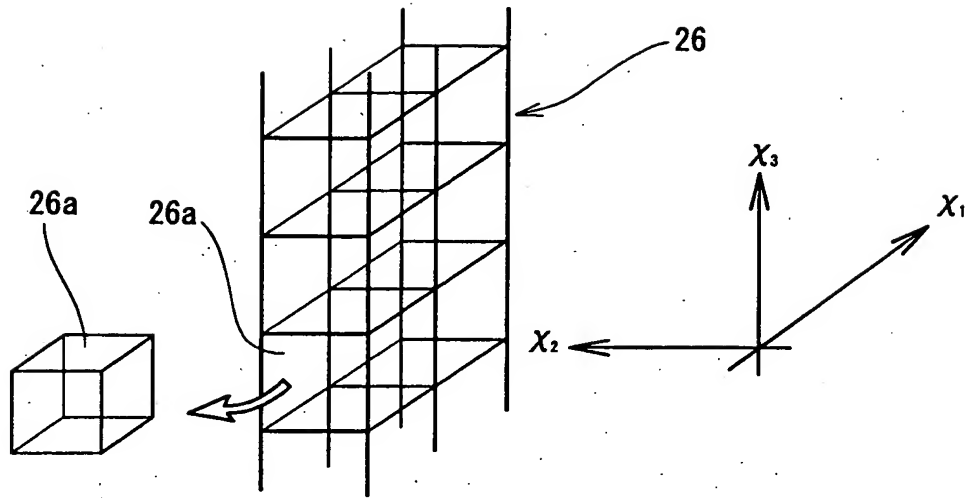
【図 3】



【図 4】

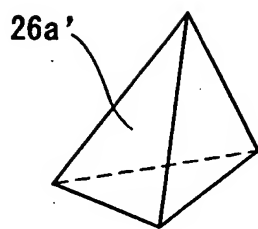


【図 5】

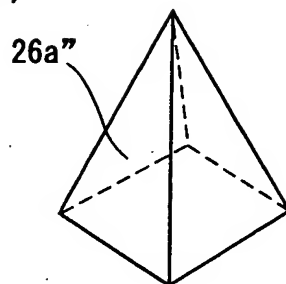


【図 6】

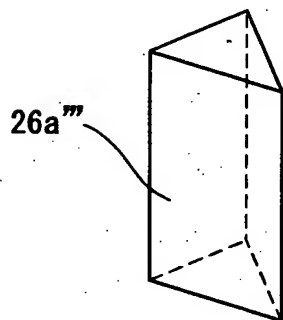
( A )



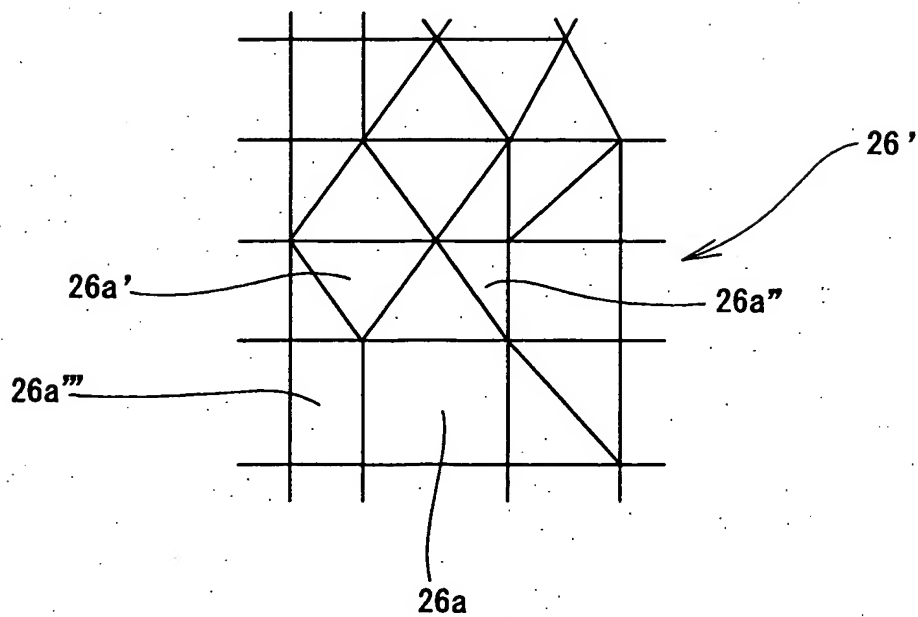
( B )



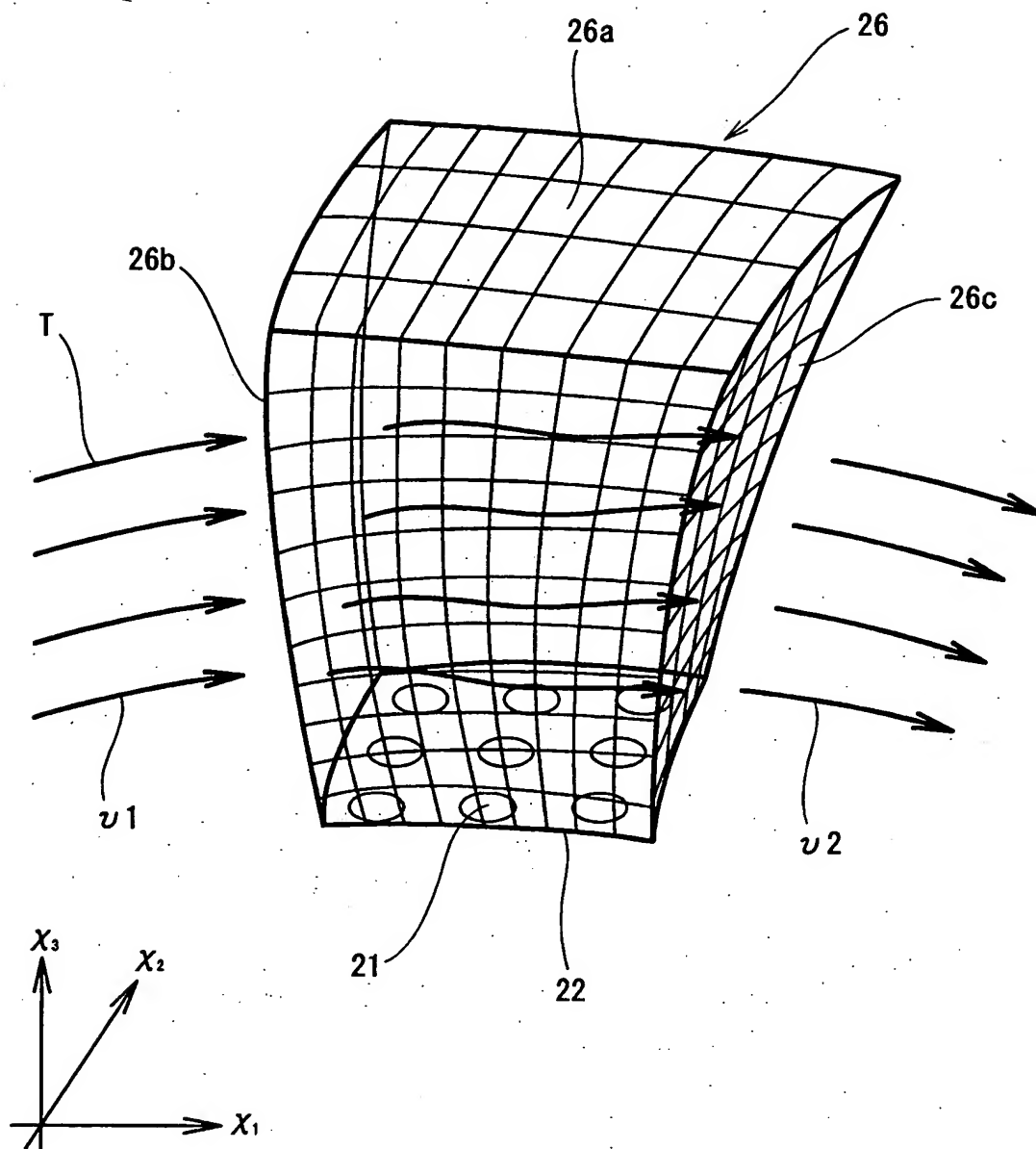
( C )



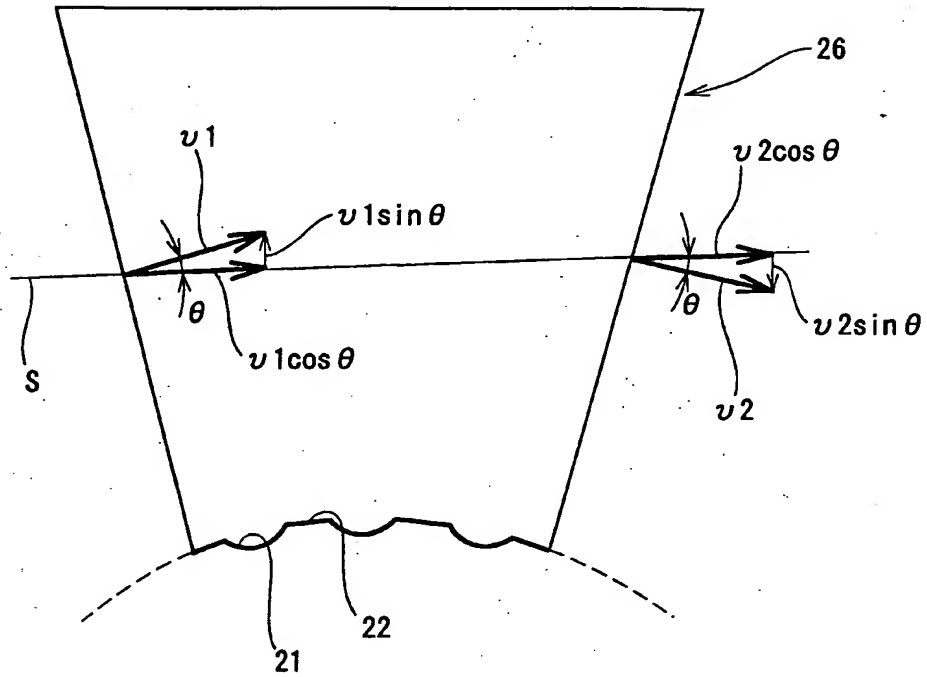
( D )



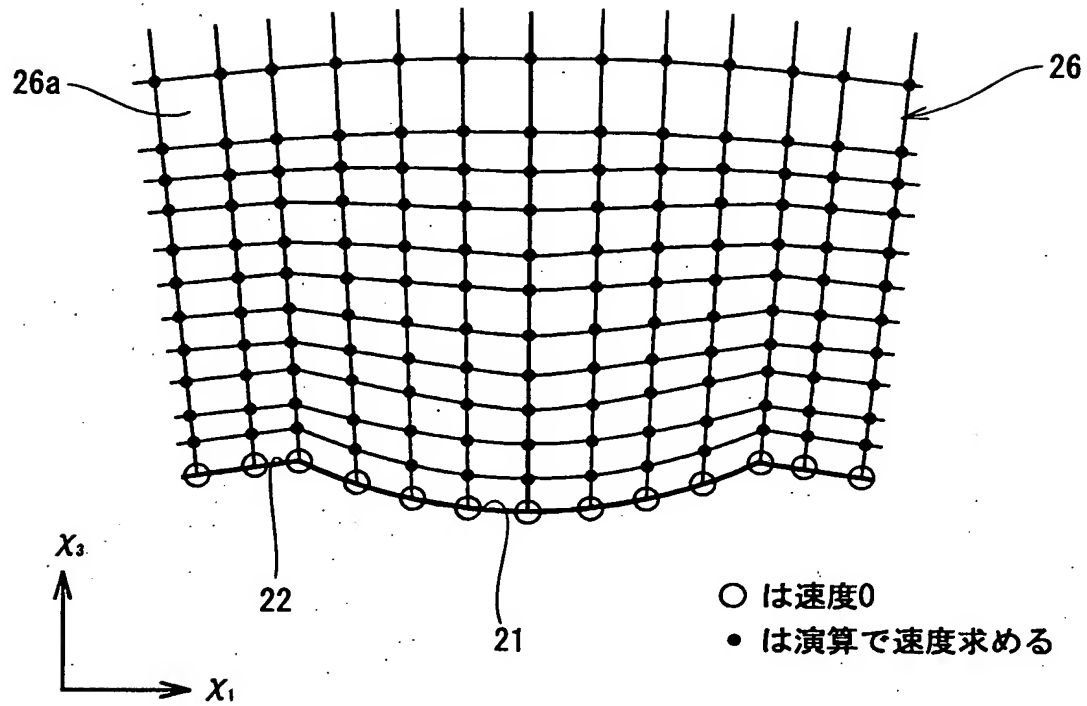
【図 7】



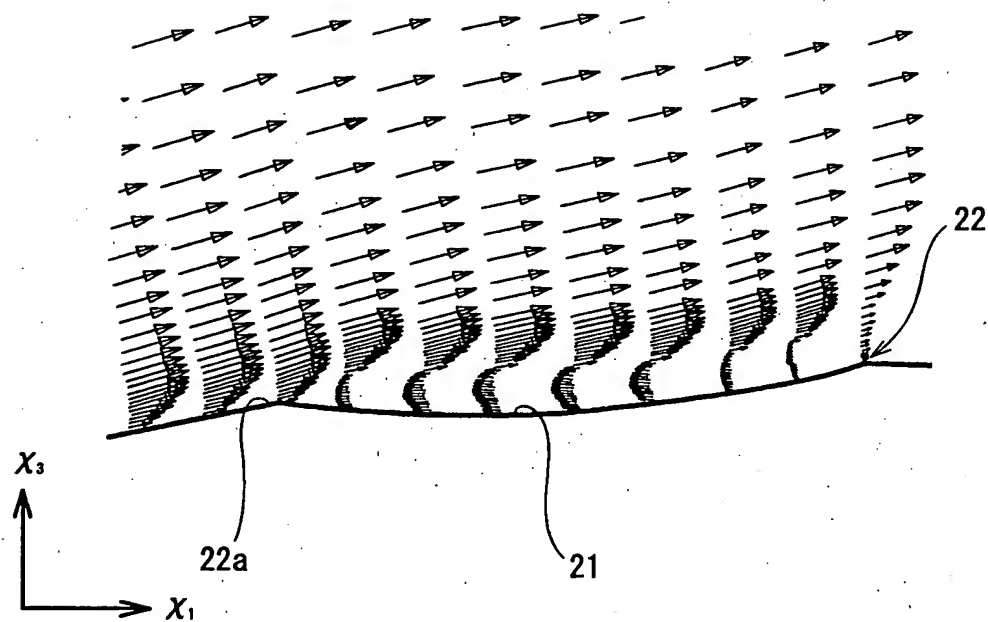
【図 8】



【図9】

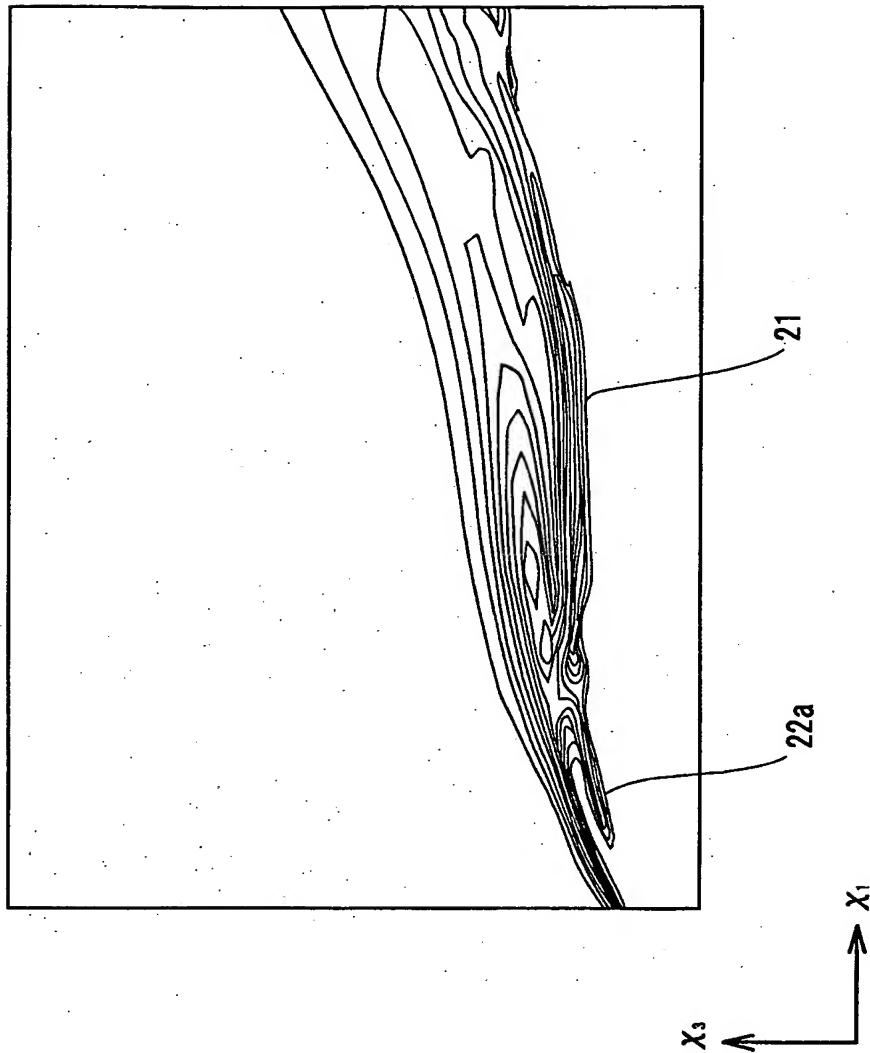


【図10】

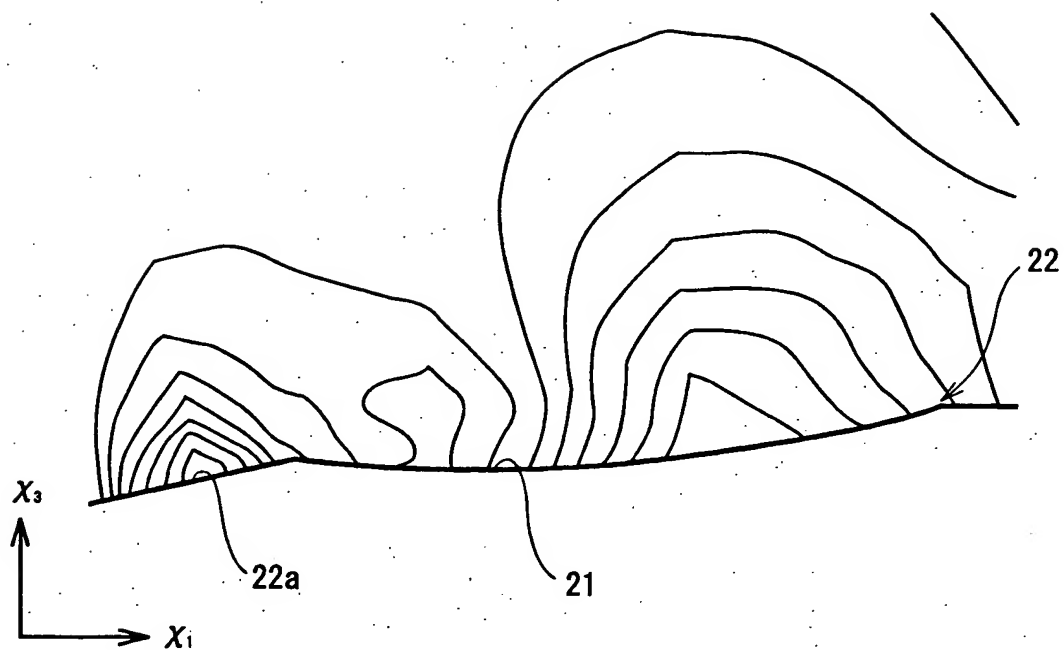




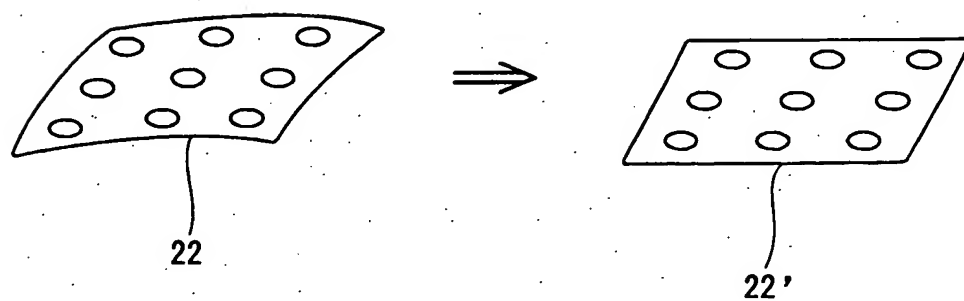
【図11】



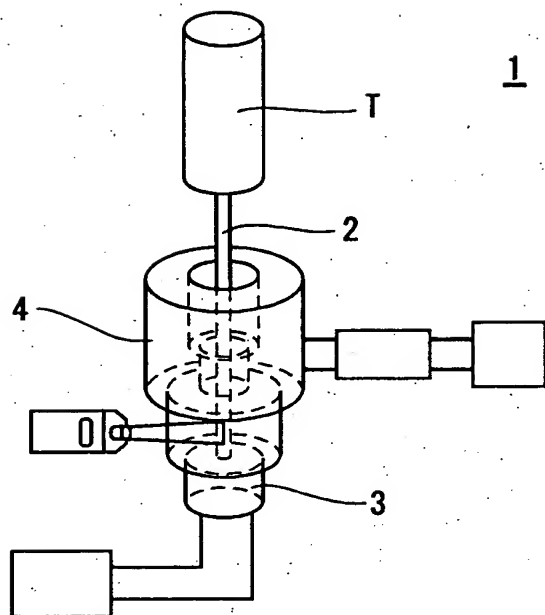
【図 12】



【図 13】



【図 14】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 物体表面の凹部による気流の影響を可視化する。

【解決手段】 コンピュータで凹部を表面に有する物体を形成すると共に、これら凹部を含むように物体の一部表面を抽出し、この抽出表面と接する空間をブロック状に区切り空間部を形成し、この空間部を区画分割して格子区画を多数形成する。シミュレーションにあたり、空間部に一方向から気体を流し、気体の運動を離散化した各格子区画毎に連続の式およびナビエストークスの式で微小時間毎に演算し、これら演算結果を基に可視化プログラムで気体の運動を可視化する。

【選択図】 図 2

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号

[000183233]

1. 変更年月日 1994年 8月17日

[変更理由] 住所変更

住 所 兵庫県神戸市中央区脇浜町3丁目6番9号

氏 名 住友ゴム工業株式会社